

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
22 septembre 2005 (22.09.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/088337 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G01S 5/14,
G01C 21/16

(30) Données relatives à la priorité :
04/01476 13 février 2004 (13.02.2004) FR

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2005/050390

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US)
: THALES [FR/FR]; 45 rue de Villiers, F-92200
Neuilly-sur-Seine (FR).

(22) Date de dépôt international :
31 janvier 2005 (31.01.2005)

(72) Inventeurs; et
(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :
COATANTIEC, Jacques [FR/FR]; THALES Intellectual
Property, 31/33 Avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil
Cedex (FR). LESOT, Bertrand [FR/FR]; THALES Intel-
lectual Property, 31/33 Avenue Aristide Briand, F-94117
Arcueil Cedex (FR).

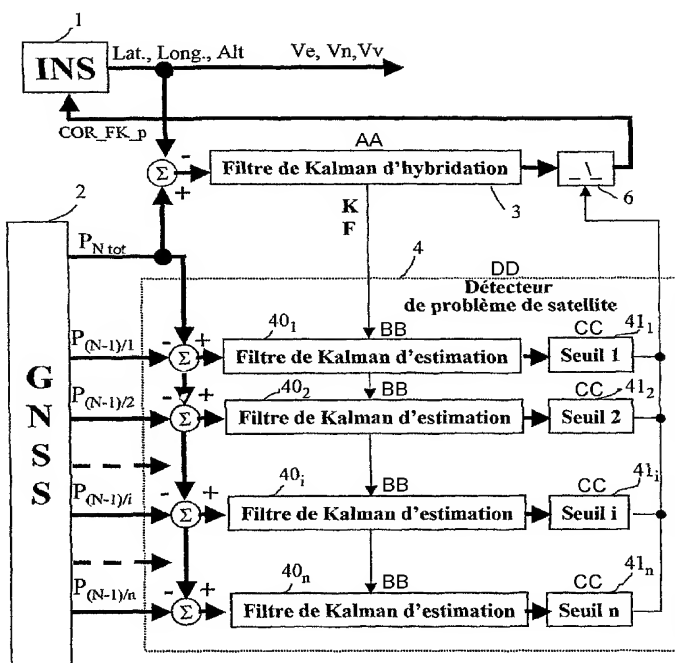
(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: DEVICE FOR MONITORING THE INTEGRITY OF INFORMATION DELIVERED BY A HYBRID INS/GNSS SYSTEM

(54) Titre : DISPOSITIF DE SURVEILLANCE DE L'INTEGRITE DES INFORMATIONS DELIVREES PAR UN SYSTEME HYBRIDE INS/GNSS



AA... KALMAN HYBRIDISATION FILTER
BB... KALMAN ESTIMATION FILTER
CC... THRESHOLD
DD... SATELLITE PROBLEM-DETECTOR

(57) Abstract: The invention relates to a device for monitoring the integrity of position- and speed-related information supplied by a hybrid system comprising an inertial unit INS (1) which is reset with the aid of a GNSS satellite positioning receiver (2) by means of a Kalman hybridisation filter (3) using a reset gain K and an evolution matrix F. The inventive device includes a satellite problem-detector circuit (4) comprising: a predictor/estimator filter bank (40_i) which uses gain K and evolution matrix F of the Kalman hybridisation filter (3), each filter observing the deviation between (i) the positioning point which is obtained from N visible satellites, in the form of geographical co-ordinates, and which is delivered by the GNSS receiver (2) and (ii) one of the positioning points P_{(N-1)/i}, also in the form of geographical co-ordinates, which are delivered by the same GNSS receiver (2) and which are obtained using N-1 of N visible satellites for resolution; and test circuits (41_i) which compare the states of the predictor/estimator filters (40_i) to the variances thereof and which detect a satellite failure when a test is positive, said deviation being greater than a detection threshold.

(57) Abrégé : Le dispositif est destiné à la surveillance de l'intégrité des informations de position et de vitesse fournies par un système hybride composé d'une centrale inertielle INS (1) recalée à l'aide d'un récepteur de positionnement par satellites GNSS (2) au moyen d'un filtre de Kalman d'hybridation (3) utilisant un gain

[Suite sur la page suivante]



(74) Mandataires : BEYLOT, Jacques etc.; THALES Intellectual Property, 31/33 Avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

(81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

de recalage K et une matrice d'évolution F. Il comporte un circuit (4) détecteur de problème satellite comportant un banc de filtres prédicteurs-estimateurs (40_i) utilisant le gain K et la matrice d'évolution F du filtre de Kalman d'hybridation (3), observant chacun l'écart entre le point de positionnement obtenu à partir des N satellites visibles, en coordonnées géographiques, délivré par le récepteur GNSS (2) et l'un des points de positionnement P_{(N-1)/i}, également en coordonnées géographiques, délivrés par ce même récepteur GNSS (2) obtenu en utilisant N-1 des N satellites visibles pour la résolution, et des circuits de test (41_i) comparant les états des filtres prédicteurs-estimateurs (40_i) à leurs variances et détectant une panne satellite lorsqu'un test est positif, l'écart trouvé étant supérieur à un seuil de détection.

DISPOSITIF DE SURVEILLANCE DE L'INTEGRITE DES INFORMATIONS DELIVREES PAR UN SYSTEME HYBRIDE INS/GNSS

L'invention est relative à la surveillance de l'intégrité des
5 informations de position et de vitesse issues d'une hybridation entre une
centrale inertielle et un récepteur de positionnement par satellites. Elle
concerne plus précisément un équipement de navigation connu dans la
technique sous le nom de système INS/GNSS (de l'anglo-saxon "Inertial
Navigation System" et "Global Navigation Satellite System") hybridé en
10 boucle fermée, l'hybridation étant dite lâche car réalisée en axes
géographiques.

Une centrale inertielle est constituée d'un ensemble de capteurs
inertiels (capteurs gyrométriques et capteurs accélérométriques) associé à
une électronique de traitement. Une plate-forme de calcul, appelée plate-
15 forme virtuelle PFV, délivre alors les informations de vitesse et de position du
porteur dans un référentiel précis (souvent noté TGL, Trièdre Géographique
Local). La plate-forme virtuelle PFV permet la projection et l'intégration des
données issues des capteurs inertiels. La centrale inertielle fournit des
informations précises à court terme mais dérivant sur le long terme (sous
20 l'influence des défauts capteurs). La maîtrise des défauts capteurs
représente une proportion très importante du coût de la centrale inertielle.

Un récepteur de positionnement par satellites fournit des
informations de position et de vitesse du porteur par triangulation à partir des
positions de satellites défilants visibles du porteur. Les informations fournies
25 peuvent être momentanément indisponibles car le récepteur doit avoir en vue
directe un minimum de quatre satellites du système de positionnement pour
pouvoir faire un point. Elles sont en outre d'une précision variable, dépendant
de la géométrie de la constellation à la base de la triangulation, et bruitées
car reposant sur la réception de signaux de très faibles niveaux provenant de
30 satellites éloignés ayant une faible puissance d'émission. Mais elles ne
souffrent pas de dérive à long terme, les positions des satellites défilants sur
leurs orbites étant connues avec précision sur le long terme. Les bruits et les
erreurs peuvent être liés aux systèmes satellitaires, au récepteur ou à la
propagation du signal entre l'émetteur satellitaire et le récepteur de signaux
35 GNSS. En outre, les données satellites peuvent être erronées par suite de

2

pannes affectant les satellites. Ces données non intègres doivent alors être repérées pour ne pas fausser la position issue du récepteur GNSS.

Pour prévenir les pannes satellites et assurer l'intégrité des mesures GNSS, il est connu d'équiper un récepteur de positionnement par satellites d'un système d'estimation de précision et de disponibilité dit RAIM (de l'anglo-saxon "Receiver Autonomous Integrity Monitoring") qui se base sur la géométrie de la constellation de satellites utilisée lors de la triangulation et sur l'évolution prévisible à court terme de cette géométrie déduite de la connaissance des trajectoires des satellites. Cependant, ce système, purement lié au système de localisation par satellites, n'est pas applicable à la surveillance d'un point de localisation issu d'un système hybride (INS/GNSS) et ne peut détecter que certains types de pannes en un temps donné.

L'hybridation consiste à combiner mathématiquement les informations de position et de vitesse fournies par la centrale inertielle et le récepteur de positionnement par satellites pour obtenir des informations de position et de vitesse en tirant avantage des deux systèmes. Ainsi, la précision sur le positionnement fourni par le système GNSS permet de maîtriser la dérive inertielle et les mesures inertielles peu bruitées permettent de filtrer le bruit sur les mesures du récepteur GNSS. Cette combinaison fait très souvent appel à la technique de filtrage de Kalman.

Le filtrage de Kalman s'appuie sur les possibilités de modélisation de l'évolution de l'état d'un système physique considéré dans son environnement, au moyen d'une équation dite "d'évolution" (estimation a priori), et de modélisation de la relation de dépendance existant entre les états du système physique considéré et les mesures par lesquelles il est perçu de l'extérieur, au moyen d'une équation dite "d'observation" pour permettre un recalage des états du filtre (estimation a posteriori). Dans un filtre de Kalman, la mesure effective ou "vecteur de mesure" permet de réaliser une estimée a posteriori de l'état du système qui soit optimale dans le sens où elle minimise la covariance de l'erreur faite sur cette estimation. La partie estimateur du filtre génère des estimées a priori du vecteur d'état du système en utilisant l'écart constaté entre le vecteur de mesure effectif et sa prédiction a priori pour engendrer un terme correctif, appelé innovation.

3

Cette innovation est appliquée à l'estimée a priori du vecteur d'état du système et conduit à l'obtention de l'estimée optimale a posteriori.

Dans le cas d'un système INS/GNSS hybridé, le filtre de Kalman reçoit les points de position et de vitesse fournis par la centrale inertielle et le
5 récepteur de positionnement par satellites, modélise l'évolution des erreurs de la centrale inertielle et délivre l'estimée a posteriori de ces erreurs qui sert à corriger le point de positionnement et de vitesse de la centrale inertielle.

L'estimation des erreurs de position et de vitesse dues aux défauts des capteurs inertiels apparaissant en sortie de la plate-forme virtuelle PFV de la centrale inertielle est réalisée par le filtre de Kalman. La
10 correction des erreurs par le biais de leur estimation faite par le filtre de Kalman peut alors se faire en entrée de la plate-forme virtuelle PFV (architecture en boucle fermée) ou en sortie (architecture en boucle ouverte).

Lorsque les défauts des capteurs de la centrale inertielle ne sont
15 pas trop importants, il n'est pas nécessaire d'appliquer les corrections en entrée de la plate-forme virtuelle PFV. La modélisation du système (linéarisation des équations régissant l'évolution du système), au sein du filtre reste valide. L'estimée a posteriori des erreurs de la centrale inertielle calculée dans le filtre de Kalman n'est utilisée que pour l'élaboration de
20 l'estimée optimale de la position et de la vitesse du porteur compte tenu des informations de position et de vitesse fournies par la centrale inertielle et par le récepteur GNSS. L'hybridation est alors dite en boucle ouverte.

Lorsque les défauts inertiels sont trop importants la linéarisation des équations régissant l'évolution du modèle inertiel intégré au sein du filtre
25 de Kalman n'est plus valide. Il est donc impératif d'appliquer les corrections à la plate-forme virtuelle PFV pour rester dans le domaine linéaire. L'estimée a posteriori des erreurs la centrale inertielle calculée dans le filtre de Kalman sert non seulement à l'élaboration de l'estimée optimale de la position et de la vitesse du porteur mais aussi au recalage de la centrale inertielle au sein
30 de la plate-forme virtuelle PFV. L'hybridation est alors dite en boucle fermée.

L'hybridation peut également se faire en observant des informations GNSS de natures différentes. Soit on considère les position et vitesse du porteur résolues par le récepteur GNSS. On parle alors d'hybridation lâche. Soit on considère les informations extraites en amont par
35 le récepteur GNSS que sont les pseudo-distances et les pseudo-vitesses

(grandeurs directement issues de la mesure du temps de propagation et de l'effet Doppler des signaux émis par les satellites en direction du récepteur). On parle alors d'hybridation serrée.

Avec un système INS/GNSS en boucle fermée où le point résolu
5 par le récepteur GNSS est utilisé pour recalibrer les informations provenant de la centrale inertielle, il est nécessaire de prêter une attention particulière aux défauts affectant les informations fournies par les satellites car le récepteur qui les reçoit propagera ces défauts à la centrale inertielle en entraînant un mauvais recalage de cette dernière. Le problème se pose de façon
10 particulièrement critique pour assurer l'intégrité d'un point hybride INS/GPS.

Une manière connue de procéder à la surveillance de l'intégrité d'un système hybride INS/GNSS en boucle fermée est décrite dans le brevet américain US 5,583,774. Elle consiste à espacer les recalages d'un temps suffisamment long (par exemple 30 minutes) pour qu'un détecteur à base de
15 filtres de Kalman surveillant l'évolution des écarts de mesures de pseudo-distance et de pseudo-vitesse par rapport au porteur de chaque satellite visible ait pu isoler les satellites défaillants.

Un autre procédé connu pour surveiller l'intégrité d'un système hybride INS/GNSS est décrit dans le brevet américain US 5,923,286. Il
20 consiste à utiliser un équipement RAIM pour autoriser ou non l'hybridation. Lorsque l'équipement RAIM signale une perte d'intégrité, l'hybridation est gelée et le point de position et de vitesse est fourni par la centrale INS en tenant compte de ses dérives et biais mesurées juste avant la perte d'intégrité. Pour que cela marche, il faut que la centrale inertielle n'ait pas été
25 polluée par l'erreur de point commise par le récepteur GNSS, ce qui interdit de la recalibrer avec le récepteur GNSS. Le procédé est donc réservé uniquement au système hybrides INS/GNSS en boucle ouverte.

La présente invention a pour but une surveillance de l'intégrité des informations de position et de vitesse d'un système hybride constitué d'une
30 centrale inertielle recalée à l'aide d'un récepteur GNSS en utilisant la position et la vitesse résolues du porteur issues du récepteur GNSS.

Elle a pour objet un dispositif de surveillance de l'intégrité d'un système hybride constitué d'une centrale inertielle INS, d'un récepteur de positionnement par satellites GNSS opérant à partir d'une constellation de N
35 satellites visibles et d'un filtre de Kalman d'hybridation ayant un vecteur

d'états correspondants aux erreurs du système hybride, en particulier, les erreurs de biais et de dérive résiduelles de la centrale inertielle INS, observant les écarts entre les points de positionnement et de vitesse fournis, en coordonnées géographiques, par la centrale inertielle INS et par le

5 récepteur GNSS, comportant une matrice d'évolution F modélisant l'évolution des erreurs du système hybride, une matrice d'observation H modélisant les relations liant le vecteur d'états et les écarts observés entre les positions et les vitesses délivrées par la centrale inertielle INS et le récepteur GNSS, et un gain K minimisant la covariance de l'erreur faite sur l'estimation a

10 posteriori des erreurs de position et de vitesse issues de la centrale inertielle, et délivrant une estimée a posteriori des erreurs du système hybride qui sert à recalibrer la centrale inertielle. Ce système de surveillance est remarquable en ce que le récepteur GNSS délivre, en plus d'un point de position effectué à partir des N satellites de la constellation qu'il a en vue, N -

15 1 points de position effectués à partir de la constellation des N satellites visibles privée, à chaque fois, d'un satellite différent et en ce qu'il comporte un circuit détecteur de problème satellite comportant un banc de N filtres prédicteurs-estimateurs de l'erreur induite par le satellite qui a été ôté lors de la résolution d'un point à N -1 satellites, ayant le gain K et la matrice

20 d'évolution F du filtre de kalman d'hybridation, observant chacun l'écart entre le point de position, en coordonnées géographiques, délivré par le récepteur GNSS en observant les N satellites visibles et l'un des points de position, également en coordonnées géographiques, délivrés par le récepteur GNSS en observant N -1 satellites visibles et des circuits de test comparant les états

25 des N filtres prédicteurs-estimateurs à leurs variances et détectant une panne satellite lorsque le test est positif, l'écart trouvé étant supérieur à un seuil de détection.

Avantageusement, les circuits de test ont des seuils de détection

30 de panne satellite qui résultent de tests statistiques tenant compte de la covariance associée au type d'erreur de positionnement considéré.

Avantageusement, les circuits de test ont des seuils de détection de panne satellite qui résultent de tests statistiques tenant compte de la

covariance associée au type d'erreur de positionnement considéré et qui sont fonction du taux de fausse alarme acceptable pour le test.

Avantageusement, le système de surveillance comporte un circuit
5 d'inhibition des recalages intercalé entre la sortie du filtre de Kalman d'hybridation et une entrée de recalage de la centrale inertielle, et activé par un test positif de détection de problème satellite.

Avantageusement, les filtres prédicteurs-estimateurs du circuit
10 détecteur de problème satellite (premier banc de filtre) ont tous la même matrice d'observation.

Avantageusement, le récepteur GNSS délivre en plus des points
de position, en coordonnées géographiques, effectués à partir des N
15 satellites visibles et ceux effectués à partir de N-1 satellites déduits de la constellation formée par les N satellites visibles en retirant à chaque fois un satellite visible différent, $N \times (N-1)/2$ points de position avec N-2 satellites déduits des N satellites visibles en retirant à chaque fois deux satellites visibles différents, et le système de surveillance comporte un circuit
20 identificateur de satellite défaillant composé d'un deuxième banc de $N \times (N-1)/2$ filtres de prédicteurs-estimateurs d'écarts de positionnement ayant le gain K et la matrice d'évolution F du filtre de Kalman d'hybridation, observant chacun l'écart entre un point de position, en coordonnées géographiques, délivré par le récepteur GNSS à partir de N-1 satellites parmi les N visibles et
25 l'un des points de positionnement délivrés par le récepteur de positionnement par satellites à partir de N-2 satellites parmi les N visibles déduite de la constellation spécifique de (N-1) satellites visibles privée de l'un de ses satellites visibles, les filtres estimateurs-détecteurs pouvant être regroupés par familles de N-2 éléments en fonction de la constellation
30 spécifique de N-1 satellites visibles prise en compte, des circuits de test comparant les états des $N \times (N-1)/2$ filtres prédicteurs-estimateurs par rapport à leurs variances afin de détecter une éventuelle anomalie et un circuit de traitement identifiant, en cas d'anomalie détectée, un satellite fautif comme étant le satellite exclu d'un point à n-1 satellites dont la famille de filtres

prédicteurs-estimateurs est la seule à n'avoir aucun de ses éléments détectant une anomalie

Avantageusement, les filtres prédicteurs-estimateurs du circuit
5 identificateur de satellite défaillant ont tous la même matrice d'observation.

Avantageusement, les filtres prédicteurs-estimateurs du détecteur
de problème satellite et du circuit identificateur de satellite défaillant ont tous
la même matrice d'observation.

10

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront
de la description ci-après d'un mode de réalisation donné à titre d'exemple.
Cette description sera faite en regard du dessin dans lequel :

- 15 - des figures 1 et 2 représentent le schéma de principe d'un
système hybride de positionnement INS/GNSS de type lâche
en boucle fermée, la figure 1 détaillant la centrale inertielle et
la figure 2 le filtre de Kalman,
- 20 - une figure 3 représente un système hybride de positionnement
INS/GNSS pourvu d'un circuit détecteur de problème satellite
conforme à l'invention,
- une figure 4 représente un système hybride de positionnement
INS/GNSS pourvu d'un circuit détecteur de problème satellites
et d'un circuit d'identificateur de satellite fautif conforme à
25 l'invention, et
- une figure 5 détaille la constitution du circuit identificateur de
satellite fautif de la figure 4.

La figure 1 montre l'architecture d'un système hybride de
30 positionnement équipé d'une centrale inertielle 1 et d'un récepteur de
positionnement par satellites GNSS 2, dit en boucle fermée et de type lâche
car il se sert des informations de position (latitude, longitude et altitude) et de
vitesse (vitesse nord, vitesse est et vitesse verticale) résolues du porteur
délivrées par le récepteur GNSS 2 pour le recalage de la centrale inertielle
35 INS 1.

Comme montré, la centrale inertielle comporte un ensemble 10 de capteurs inertiels (accéléromètres et gyromètres) et de circuits de calcul, appelés plate forme virtuelle PFV, pour effectuer les calculs de position, attitude et vitesses sur les sorties des capteurs inertiels. La plate-forme virtuelle PFD comporte principalement un ensemble d'intégrateurs 11 opérant sur les signaux Ω des gyromètres afin d'en déduire l'attitude du porteur, un changeur de repère 12 permettant, à partir de la connaissance de l'orientation du porteur (attitude) du porteur, d'exprimer dans un repère géographique lié à la terre, les accélérations acc mesurées par les accéléromètres dans un repère lié au porteur et deux ensembles intégrateurs successifs 13, 14 opérant sur les composantes de l'accélération selon le repère géographique pour en déduire les composantes de la vitesse du porteur par rapport au nord V_n , par rapport à l'est V_e et par rapport à la verticale V_v ainsi que la position du porteur en latitude, longitude et altitude. Les capteurs inertiels souffrent de défauts inhérents à leur conception : des biais et des dérives qui font que les informations de position et d'attitude délivrées par une centrale inertielle se dégradent avec le temps de fonctionnement. La lutte contre ces défauts est coûteuse, ainsi il existe différentes classes de centrale inertielle en fonction des tolérances de biais et de dérives acceptées.

Le récepteur GNSS 2 est, par exemple un récepteur GPS. Il mesure les pseudo-distances et pseudo-vitesses du porteur par rapport à au moins quatre satellites visibles du porteur du système hybride de positionnement et résout, par triangulation, la position du porteur en latitude, longitude et altitude ainsi que les composantes de sa vitesse par rapport au nord V_n , par rapport à l'est V_e et par rapport à la verticale V_v . Il ne sera pas détaillé plus avant car il est bien connu de l'homme du métier et largement décrit dans la littérature où de nombreux ouvrages lui ont été consacrés, par exemple le livre de Elliot D. KAPLAN intitulé "Understanding GPS Principles and Applications" paru chez Artech House Publishers ISBN 0-89006-793-7. Les informations de position et de vitesse délivrées par un récepteur GNSS ne souffrent pas de dérive puisqu'elles proviennent de mesures instantanées des éloignements et vitesses d'éloignement de satellites dont les orbites et les positions sur leurs orbites sont connues à long terme. Par contre, elles souffrent d'indisponibilités, lorsque qu'il n'y a pas un minimum de quatre

satellites visibles. Elles sont bruitées car elles proviennent du traitement de signaux reçus qui sont de très faibles niveaux d'énergie en raison de la distance d'éloignement des satellites et de leurs faibles puissances d'émission et qui peuvent avoir été corrompus en cours de transmission
 5 (rencontre de particules chargées entre le satellite et le récepteur). Leur fiabilité dépend de celle des informations transmises par les satellites.

Par rapport au récepteur GNSS, la centrale inertielle a l'avantage de ne pas faire appel à la collaboration d'équipements extérieurs au porteur et donc de ne pas être aussi sensible à l'extérieur. L'intégrité et la
 10 disponibilité des informations inertielles étant bien meilleures, la centrale inertielle conserve tout son intérêt. Pour lutter contre sa dérive et ses biais autrement que par des mesures coûteuses prises au niveau de ses capteurs inertiels, il a été proposé de la recalibrer périodiquement au moyen du point de position et de vitesse fourni par un récepteur GNSS, après un filtrage
 15 antibruit.

Ce recalage se fait au moyen d'un filtre de Kalman 3 dit d'hybridation montré de manière plus détaillée à la figure 2.

Un filtre de Kalman permet d'obtenir une estimation de l'état a posteriori d'un système, optimale dans le sens où la covariance de l'erreur
 20 faite sur cette estimation a posteriori est minimale (on parle aussi d'estimation optimale au sens des moindres carrés). Il se base sur une modélisation de l'évolution du système et sur une modélisation de la relation existant entre la mesure et l'état du système.

Dans sa plus grande généralité, la modélisation de l'évolution de
 25 l'état du système est définie par une équation différentielle vectorielle linéarisée au premier ordre qui s'exprime, après discrétisation du modèle continu, par une équation d'évolution de la forme:

$$x_{K+1} = F_K x_K + L_K u_i + w_K$$

x étant le vecteur d'état de dimension p, u un vecteur de contrôle, F_K la
 30 matrice d'évolution définissant la relation entre le vecteur d'état à l'étape K et le vecteur d'état à l'étape K+1 en l'absence de vecteur de contrôle et de bruit de fonctionnement, L_K une matrice définissant la relation entre le vecteur de contrôle et le vecteur d'état au cours d'une même étape et w_K un bruit de fonctionnement au cours d'une étape, supposé blanc et gaussien à valeur
 35 moyenne nulle.

La modélisation de la relation existant entre la mesure et l'état du système est définie par une autre équation différentielle du premier ordre qui s'exprime, après discrétisation du modèle continu, par une équation d'observation de la forme:

$$z_K = H_K x_K + v_K$$

z étant le vecteur de mesure (grandeurs du systèmes physiquement observables) de dimension m, H_K la matrice d'observation définissant la relation entre le vecteur de mesure et le vecteur d'état au cours d'une même étape et v_K un bruit de mesure au cours d'une étape supposé blanc et gaussien à valeur moyenne nulle.

Le filtre de Kalman montré à la figure 2 ne comporte pas de vecteur de contrôle et donc pas de matrice L_K . Il est récursif et repose sur la détermination d'une estimation a priori $\hat{x}_{K/K-1}$ du vecteur d'état du système à l'étape K à partir de la connaissance a posteriori du vecteur d'état du système $x_{K-1/K-1}$ à l'étape précédente K-1 et de l'application à l'estimée a priori $\hat{x}_{K/K-1}$ d'un terme correcteur dépendant de l'écart constaté entre le vecteur mesure z_K constaté au cours de cette étape K et son estimée a priori $\hat{z}_{K/K-1}$ déduite de l'estimation a priori $\hat{x}_{K/K-1}$ du vecteur d'état.

L'estimée a priori $\hat{z}_{K/K-1}$ du vecteur de mesure à l'étape K est déterminée par application des équations d'évolution et d'observation à l'estimée a posteriori $x_{K-1/K-1}$ du vecteur d'état correspondant à l'étape K-1 précédente. Cette opération est illustrée sur la figure 2 par la présence d'une boucle de rétroaction constituée d'un circuit à retard 30 et de deux filtres 31, 32.

Le circuit à retard 30 connecté en sortie du filtre de Kalman permet de mémoriser l'estimée a posteriori $x_{K-1/K-1}$ du vecteur d'état disponible à la sortie du filtre de Kalman au cours de l'étape précédente K-1.

Le filtre 31 permet, par mise en œuvre de l'équation d'évolution, l'obtention de l'estimée à priori $\hat{x}_{K/K-1}$ du vecteur d'état à l'étape K, à partir de l'estimée a posteriori $\hat{x}_{K-1/K-1}$ du vecteur d'état du système à l'étape précédente K-1. Sa fonction de transfert est définie par la matrice F_{K-1} de l'équation d'évolution.

Cette estimée a priori $\hat{x}_{K/K-1}$ du vecteur d'état à l'étape K est ensuite utilisée pour obtenir, au moyen d'un deuxième filtre 32, l'estimée a priori $\hat{z}_{K/K-1}$ du vecteur de mesure à l'étape K par application de l'équation

11

d'observation. Ce deuxième filtre 32 a, pour ce faire, une fonction de transfert définie par la matrice H_K de l'équation d'observation.

L'estimée a priori $\hat{z}_{K/K-1}$ du vecteur de mesure à l'étape K obtenue dans la boucle de rétroaction est appliquée, en entrée du filtre de Kalman, à
 5 un circuit soustracteur 33 qui reçoit par ailleurs le vecteur de mesure z_K effectivement mesuré au cours de l'étape K et qui délivre un vecteur d'erreur r_K , également appelé innovation, attestant de l'erreur commise lors de l'estimation a priori. Ce vecteur d'erreur r_K est transformé par un troisième filtre 34 en un vecteur de correction. Ce vecteur de correction est additionné
 10 par un deuxième sommateur 35 à l'estimée a priori $\hat{x}_{K/K-1}$ du vecteur d'état pour l'étape K issue du premier filtre 31, pour obtenir l'estimée a posteriori $x_{K/K}$ du vecteur d'état qui constitue la sortie du filtre de Kalman.

Le troisième filtre 34, qui fournit le terme correctif, est connu sous le nom de filtre de gain de recalage. Il a une fonction de transfert définie par
 15 une matrice K_K déterminée de façon à minimiser la covariance de l'erreur faite sur l'estimation a posteriori.

Kalman a montré que la matrice de gain optimal K_K pouvait être déterminée par une méthode récursive à partir des équations:

- de la matrice de covariance de l'estimée a priori du vecteur
 20 d'état

$$P_{K/K-1} = F_{K-1} P_{K-1/K-1} F_{K-1}^T + Q_{K-1}$$

- de définition de la matrice de gain elle-même

$$K_K = P_{K/K-1} H_K^T (H_K P_{K/K-1} H_K^T + R_K)^{-1}$$

- de mise à jour de la matrice de covariance de l'estimée a
 25 posteriori du vecteur d'état

$$P_{K/K} = (I - K_K H_K) P_{K/K-1}$$

P étant la matrice de covariance du vecteur d'état, soit estimée a priori pour l'étape K à partir de l'étape K-1 si P est affecté de l'indice K/K-1, soit estimée a posteriori si P est affecté de l'indice K-1/K-1,

30 R étant la matrice de covariance des bruits d'observation w_K ,

Q étant la matrice de covariance des bruits d'état (ou de fonctionnement) v_K .

A l'initialisation, la matrice de covariance du vecteur d'état et le vecteur d'état sont pris égaux à leurs estimées les plus vraisemblables. Au pire, la matrice de covariance est une matrice diagonale avec des termes
 35 infinis ou très grands (de façon à avoir des écarts-type très grands devant le

domaine dans lequel le vecteur d'état est susceptible d'évoluer) et l'estimée du vecteur d'état le vecteur nul, lorsque l'on n'a aucune idée sur les valeurs initiales.

En pratique, le gain de correction d'un filtre de Kalman est
5 "proportionnel" à l'incertitude sur l'estimation a priori de l'état du système et
"inversement proportionnel" à l'incertitude sur la mesure. Si la mesure est
très incertaine et l'estimation de l'état du système relativement précise, l'écart
constaté est principalement dû au bruit de mesure et la correction qui en
10 découle doit être faible. Au contraire, si l'incertitude sur la mesure est faible
et celle sur l'estimation de l'état du système grande, l'écart constaté est très
représentatif de l'erreur d'estimation et doit conduire à une correction forte.
C'est le comportement vers lequel on tend avec le filtre de Kalman.

En résumé, un filtre de Kalman sans vecteur de contrôle est défini
par une matrice F_K correspondant à l'équation d'évolution définissant
15 l'évolution du vecteur d'état du système physique modélisé, une matrice H_K
correspondant à l'équation d'observation définissant les relations permettant
de passer du vecteur d'état au vecteur de mesure et une matrice de gain K_K
mise à jour à l'aide d'un processus itératif mettant en jeu la matrice de
covariance du vecteur d'état P elle-même mise à jour au cours du processus
20 itératif et des matrices de covariance Q_K et R_K des bruits d'état et de mesure.

Le filtre de Kalman 3 opère au niveau des écarts constatés entre
deux versions des informations de même type provenant l'une, de la centrale
inertielle INS 1 et l'autre, du récepteur GNSS 2, car cela permet de travailler
sur des variables ayant des domaines de variation plus restreints sur
25 lesquels l'approximation linéaire peut être utilisée pour simplifier les
équations de modélisation et d'évolution (on parle alors de filtre aux erreurs).

Dans ce cadre, l'équation d'évolution du filtre de Kalman modélise
l'évolution prévisible des erreurs sur le système hybride liés aux résidus des
défauts capteurs inertiels non estimés et à la mécanisation de la plate forme
30 inertielle (ici boucle fermée) de la centrale inertielle 1 qu'il déduit des
différences constatées entre la prévision d'écart qu'il fait et les écarts
effectivement mesurés entre la position et la vitesse issues de la centrale
inertielle et du récepteur GNSS. Elle est déterminée par la matrice F dont la
définition est fonction du mouvement du porteur, c'est-à-dire des paramètres
35 de vol dans le cas où le porteur équipé du système hybride de

13

positionnement est un aéronef. La définition des différentes versions de cette matrice F en fonction des paramètres du mouvement du porteur sort du domaine de la présente invention. Elle ne sera pas détaillée dans la suite car elle est bien connue de l'homme du métier spécialisé dans le domaine de l'inertie.

Les résidus $x_{K/K}$ des erreurs du système hybride estimés a posteriori par le filtre de Kalman d'hybridation 3 sont utilisés pour le recalage de la centrale inertielle INS 1 (boucle fermée). Les informations inertielles INS 1 étant régulièrement recalées, les points de position et de vitesse hybrides sont supposés plus fiables à condition que les mesures GNSS soient intègres.

Pour résumer, le traitement effectué par le filtre de Kalman d'hybridation se divise en trois temps :

- Propagation du vecteur d'état et de la matrice de variance-covariance associée

$$\begin{aligned} X_{K+1/K} &= F_{K+1} \cdot X_{K/K} + COR_FK_p_K \\ P_{K+1/K} &= F_K \cdot P_{K/K} \cdot F_K^T + Q_K \end{aligned}$$

- Recalage du vecteur d'état et de la matrice de variance-covariance à l'aide du gain K_{K+1}

$$\begin{aligned} K_{K+1} &= P_{K+1/K} \cdot H_{K+1}^T \cdot (H_{K+1} \cdot P_{K+1/K} \cdot H_{K+1}^T + R_{K+1})^{-1} \\ X_{K+1/K+1} &= X_{K+1/K} + K_{K+1} \cdot (Z_{K+1} - H_{K+1} \cdot X_{K+1/K}) \\ P_{K+1/K+1} &= P_{K+1/K} - K_{K+1} \cdot H_{K+1} \cdot P_{K+1/K} \end{aligned}$$

- Application des corrections issues du filtre de Kalman d'hybridation à la centrale inertielle

$$COR_FK_p_K = -X_{K/K}$$

La matrice d'observation H_{K+1} permet l'observation des différences entre les positions et vitesses issues de la plate-forme virtuelle PFV et les positions et vitesses GNSS résolues. La matrice d'évolution F_{K+1} est calculée en utilisant les données de la plate-forme virtuelle PFV corrigées par le filtre de Kalman et permet la propagation de l'état et de la matrice de variance-covariance associée.

Le problème rencontré avec les systèmes hybrides de positionnement INS/GNSS en boucle fermée est le risque de voir les opérations de recalage propager à la centrale inertielle 1 les erreurs de position et de vitesse commises par le récepteur GNSS 2 en raison

14

d'informations défectueuses lui parvenant d'un ou plusieurs satellites défaillants (mauvaises corrections appliquées par le filtre de Kalman à la plate-forme virtuelle PFV, mauvaise estimation des défauts inertiels). L'intégrité du système hybride de positionnement INS/GNSS en boucle fermée est alors difficile à assurer.

La figure 3 illustre le schéma d'un système hybride INS/GNSS en boucle fermée équipé d'un détecteur de problème satellite opérant à partir des points de position, en coordonnées géographiques, effectués par le récepteur GNSS 2 avec tous les satellites visibles supposés au nombre de N et avec tous les satellites visibles moins l'un d'entre eux, le satellite visible écarté étant l'un quelconque d'entre eux.

Le détecteur de problème satellite 4 comporte un banc de N filtres prédicteurs-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ associé à un banc de circuits de test $41_1, 41_2, \dots, 41_i, \dots, 41_N$ contrôlant, par un circuit inhibiteur 5 intercalé à la sortie du filtre de Kalman d'hybridation 3, la possibilité d'un recalage de la centrale inertielle 1.

Les filtres prédicteurs-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ fonctionnent en boucle ouverte.

Le vecteur d'état du ième filtre prédicteur-estimateur 40_i est composé des erreurs par rapport au vecteur d'état du filtre de Kalman d'hybridation induites par la non prise en compte dans le récepteur GNSS 2 des informations données par le ième satellite visible et même plus généralement par rapport à des mesures faites par d'autres équipements de navigation comme un altimètre barométrique ou un anémomètre.

25

$$Err^i = \begin{bmatrix} \text{erreurs_attitude_par_rapport_FK} \\ \text{erreurs_vitesse_par_rapport_FK} \\ \text{erreurs_position_par_rapportFK} \\ \text{erreurs_biais_accéléro_par_rapport_FK} \\ \text{erreurs_dérives_gyro_par_rapprot_FK} \\ \text{erreurs_baro_par_rapport_FK} \\ \text{erreurs_anémo_par_rapport_FK} \end{bmatrix}$$

15

Les matrices d'évolution F_K des différents filtres prédicteurs-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ sont identiques à celle F_K du filtre de Kalman d'hybridation 3 :

$$\hat{Err}_{K+1/K}^i = F_{K+1} \cdot Err_{K/K}^i \quad (1)$$

- 5 La mesure Z^i d'un ième filtre prédicteur-estimateur 40_i est constituée de l'écart entre la position, en coordonnées géographiques (latitude, longitude et altitude), résultant du point de positionnement $P_{N_{tot}}$ effectué par le récepteur GNSS 2 en tenant compte de tous les N satellites visibles et la position, en coordonnées géographiques, résultant du point de positionnement $P_{(N-1)/i}$ effectué par le récepteur GNSS 2 en écartant les informations envoyées par le ième satellite :

$$Z^i = \begin{pmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \\ \Delta z^i \end{pmatrix} = P_{N-1/i} - P_{N_{tot}}$$

- 15 Les matrices H d'observation des différents filtres prédicteurs-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ sont toutes identiques et correspondent à l'équation d'observation permettant de passer du vecteur d'état Err^i au vecteur de mesure Z^i .

- Les gains des différents filtres prédicteurs-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ sont tous pris égaux à celui K du filtre de Kalman d'hybridation 3 de façon que le recalage sur les mesures z^i qu'ils reçoivent se passe comme le recalage du filtre de Kalman d'hybridation 3.

- Compte tenu de ces choix, les recalages des vecteurs d'état Err^i des filtres prédicteurs-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ répondent à la relation :

$$Err_{K+1/K+1}^i = Err_{K+1/K}^i + K_{K+1} \cdot (Z_{K+1}^i - H_{K+1} \cdot Err_{K+1/K}^i) \quad (2)$$

- Pour détecter la défaillance de l'un au moins des N satellites visibles par le récepteur de positionnement GNSS 2, on effectue des tests statistiques sur les vecteurs d'état Err^i disponibles en sortie des différents filtres prédicteurs-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ au moyen du banc des circuits de test $41_1, 41_2, \dots, 41_i, \dots, 41_N$. Ces circuits de test réalisent des tests statistiques consistant à admettre une panne de satellite si, pour i allant de 1 au nombre N de satellites visibles, l'une des deux inégalités sur les erreurs

de position des filtres prédictors-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ suivantes est vérifiée :

$$\begin{aligned} & \left| Err_{K+1/K}^i(err_lat)^* . Err_{K+1/K}^i(err_lat) \right| > K_seuil * K_seuil . COV_Err_{K+1/K}^i(err_lat) \\ 5 \quad & \text{ou} \\ & \left| Err_{K+1/K}^i(err_lon)^* . Err_{K+1/K}^i(err_lon) \right| > K_seuil * K_seuil . COV_Err_{K+1/K}^i(err_lon) \end{aligned}$$

La variable K_seuil contrôle indirectement la valeur de l'erreur radiale acceptable. Elle est choisie en fonction du taux recherché de fausse
10 alarme. Pour une probabilité de fausse alarme de 10^{-6} , on prendra une valeur de 5,06 environ (répartition gaussienne) pour la variable K_seuil .

La réalisation de ces tests statistiques implique que l'on soit capable de propager et de recalculer les variances associées aux vecteurs d'état Err^i des différents filtres prédictors-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$.
15 La propagation et le recalage peuvent se dérouler ainsi :

A l'initialisation, on pose :

$$COV_Err_{0/0}^i = [0]$$

[0] étant la matrice nulle.

20 A la première propagation, par définition :

$$COV_Err_{1/0}^i = E \left[\hat{Err}_{1/0}^i . Err_{1/0}^{iT} \right]$$

ce qui s'écrit en raison de la relation (1) :

$$25 \quad COV_Err_{1/0}^i = E \left[(F_1 . Err_{0/0}^i + u_1^i) (F_1 . Err_{0/0}^i + u_1^i)^T \right]$$

u^i étant un bruit blanc (bruit d'état).

D'où :

$$30 \quad COV_Err_{1/0}^i = F_1 . COV_Err_{0/0}^i . F_1^T + Q_1$$

F étant la matrice d'évolution du filtre de Kalman d'hybridation 3 et Q_1 la matrice de covariance des bruits d'état du filtre de Kalman d'hybridation 3.

Au premier recalage, par définition :

$$COV_Err_{1/1}^i = E[Err_{1/1}^i . Err_{1/1}^{iT}]$$

ce qui s'écrit, en tenant compte de la relation (2) :

5

$$COV_Err_{1/1}^i = E[(Err_{1/0}^i + K_1.(Z^i - H_1.Err_{1/0}^i))(Err_{1/0}^i + K_1.(Z^i - H_1.Err_{1/0}^i))^T]$$

En développant cette expression, on trouve :

$$10 \quad COV_Err_{1/1}^i = E[Err_{1/0}^i . Err_{1/0}^{iT}] + K_1.E[Z^i . Z^{iT}]K_1^T + K_1.H_1.E[Err_{1/0}^i . Err_{1/0}^{iT}]H_1^T.K_1^T \dots \\ \dots - E[Err_{1/0}^i . Err_{1/0}^{iT}]H_1^T.K_1^T - K_1.H_1.E[Err_{1/0}^i . Err_{1/0}^{iT}]$$

D'où :

$$15 \quad COV_Err_{1/1}^i = (I - K_1.H_1).COV_Err_{1/0}^i.(I - K_1.H_1)^T + K_1.E[Z^i . Z^{iT}]K_1^T$$

I étant la matrice identité.

Le premier terme de l'expression du recalage de la matrice de covariance se calcule à partir de la matrice d'observation H_1 des filtres prédictors-estimateurs $40_1, 40_2, \dots, 40_i, \dots, 40_N$ et de la matrice de gain K_1 du filtre de Kalman d'hybridation 3. Le deuxième terme se calcule au moyen des matrices de variance-covariance utilisées dans les calculs des moindres carrés effectués pour la résolution des position, vitesse et temps dans le récepteur GNSS 2, lors des points de positionnement à N et (N-1) satellites.

25 En effet, lors de cette résolution, la méthode des moindres carrés évalue le degré de confiance sur les points résolus par l'intermédiaire des matrices de variances covariances (matrices $E[P_{(n-1)/i}.P_{(n-1)/i}^T]$ pour les N points à (N-1) satellites et $E[P_{tot}.P_{tot}^T]$ pour le point à N satellites).

Or :

$$30 \quad E[Z^i . Z^{iT}] = E[(P_{(N-1)/i} - P_{tot})(P_{(N-1)/i} - P_{tot})^T]$$

Car :

18

$$Z^i = \begin{pmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \\ \Delta z^i \end{pmatrix} = P_{(N-1)/i} - P_{tot}$$

En développant la première expression, on obtient :

$$E[Z^i \cdot Z^{iT}] = E[P_{(N-1)/i} \cdot P_{(N-1)/i}^T] + E[P_{tot} \cdot P_{tot}^T] - E[P_{(N-1)/i} \cdot P_{tot}^T] - E[P_{tot} \cdot P_{(N-1)/i}^T]$$

5

Les deux premiers termes sont connus. Ils sont directement fournis par les calculs des moindres carrés lors de la résolution des différents points de position, vitesse et temps effectués par le récepteur GNSS 2.

Les termes $E[P_{(N-1)/i} \cdot P_{tot}^T]$ et $E[P_{tot} \cdot P_{(N-1)/i}^T]$, traduisant l'inter-corrélation entre le point de positionnement P_{tot} à N satellites et les points de positionnement $P_{(N-1)/i}$ à (N-1) satellites, peuvent être évalués en reprenant l'expression des moindres carrés de chaque point.

En effet, on a :

$$P_{(N-1)/i} = H_{(N-1)/i}^* \cdot d$$

15 $H_{(N-1)/i}^*$ étant la matrice pseudo-inverse utilisée dans la résolution position, vitesse et temps faite lors du point de positionnement effectué à N-1 satellites (absence du ième satellite) :

$H_{(N-1)/i}^* = (H_{(N-1)/i}^T \cdot H_{(N-1)/i})^{-1} \cdot H_{(N-1)/i}^T$ étant construite à partir de la matrice $H_{(N-1)/i}$ qui est la matrice des cosinus directeurs liant les pseudo-distances d à

20 la position résolue par la relation : $d = H_{(N-1)/i} \cdot P_{(N-1)/i}$

d étant le vecteur formé par les pseudo-distances.

Ainsi :

$$\begin{aligned} E[P_{(N-1)/i} \cdot P_{tot}^T] &= E[(H_{(N-1)/i}^* \cdot d)(H_{tot}^* \cdot d)^T] \\ &= E[d \cdot d^T] H_{(N-1)/i}^* \cdot H_{tot}^{*T} \end{aligned}$$

25 Or :

$$H_{(N-1)/i}^* \cdot H_{tot}^{*T} = (H_{(N-1)/i}^T \cdot H_{(N-1)/i})^{-1} \cdot H_{(N-1)/i}^T \cdot H_{tot} \cdot \{(H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1}\}^T$$

et :

$$\{(H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1}\}^T = (H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1}$$

30 car la relation :

$$(H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1} (H_{tot}^T \cdot H_{tot}) = I$$

entraîne :

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \left\{ (H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1} (H_{tot}^T \cdot H_{tot}) \right\}^T = I \\ &\Leftrightarrow H_{tot}^T \cdot H_{tot} \cdot \left\{ (H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1} \right\}^T = I \\ &\Leftrightarrow (H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1} = \left\{ (H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1} \right\}^T \end{aligned}$$

De ce fait :

$$5 \quad H_{(N-1)/i}^* \cdot H_{tot}^{*T} = (H_{(N-1)/i}^T \cdot H_{(N-1)/i})^{-1} \cdot H_{(N-1)/i}^T \cdot H_{tot} \cdot (H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1}$$

En outre, on a l'égalité suivante :

$$H_{tot}^T \cdot H_{(N-1)/i} = H_{(N-1)/i}^T \cdot H_{(N-1)/i}$$

- 10 La matrice $H_{(N-1)/i}$ ne diffère de la matrice H_{tot} que par la ième ligne qui est nulle dans le cas de la matrice $H_{(N-1)/i}$ et qui comporte les cosinus directeurs de la ligne à vue du ième satellite dans le cas de la matrice H_{tot} . En effectuant le produit de matrices $H_{tot}^T \cdot H_{(N-1)/i}$, les termes de la ième colonne de la matrice H_{tot}^T sont multipliés par les termes nuls de la
- 15 matrice $H_{(N-1)/i}$. Ainsi, si les termes de la ième colonne d'une matrice multipliée par la matrice $H_{(N-1)/i}$ sont déjà nuls (comme dans le cas de la matrice $H_{(N-1)/i}^T$), il n'y a pas de changement. Cela explique l'égalité ci-dessus. Par conséquent :

$$\begin{aligned} 20 \quad H_{(N-1)/i}^* \cdot H_{tot}^{*T} &= (H_{(N-1)/i}^T \cdot H_{(N-1)/i})^{-1} \cdot H_{(N-1)/i}^T \cdot H_{(N-1)/i} \cdot (H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1} \\ &= (H_{tot}^T \cdot H_{tot})^{-1} \\ &= H_{tot}^* \cdot H_{tot}^{*T} \end{aligned}$$

donc :

$$E[P_{(N-1)/i} \cdot P_{tot}^T] = E[P_{tot} \cdot P_{tot}^T]$$

Finalement, nous avons la relation :

$$25 \quad E[Z^i \cdot Z^{iT}] = E[P_{(N-1)/i} \cdot P_{(N-1)/i}^T] - E[P_{tot} \cdot P_{tot}^T]$$

qui montre que la matrice $E[Z^i \cdot Z^{iT}]$ peut être évaluée à partir des matrices issues des calculs des différents points de position, vitesse et temps effectués par le récepteur GNSS 2.

Le premier recalage et la première propagation ne posent donc pas de problème. Les matrices d'évolution F_1 et de gain K_1 utilisées sont celles du filtre de Kalman d'hybridation 3 tandis que la matrice d'observation H est commune à tous les filtres prédictors-estimateurs $40_1, 40_2, \dots,$
5 $40_i, \dots, 40_N$.

Par récurrence, il est possible de montrer qu'il en est de même pour les recalages et propagations suivants.

Dès qu'au moins un des tests statistiques est levé ou positif, il y a suspicion de mauvais fonctionnement de l'un des satellites visibles sur
10 lesquels se base le récepteur GNSS 2 pour déterminer position et vitesse du porteur. Ce franchissement est utilisé pour déclencher le circuit inhibiteur 5 intercalé entre la sortie du filtre de Kalman d'hybridation 3 et l'entrée de recalage de la centrale inertielle 1, le satellite fournissant des données erronées ne sera réintégré que lorsque tous les tests statistiques ne seront
15 plus levés, avec éventuellement un délai supplémentaire de précaution.

On remarque qu'il est également possible d'estimer un rayon de protection sur la position hybride issue de la centrale inertielle 1 en utilisant la méthode du maximum de séparation.

Le circuit 4 de détection de problème satellite ne permet pas
20 d'identifier le satellite fautif car l'information erronée provenant de ce satellite est prise en compte dans le point à N satellites visibles qui sert de référence.

Sachant que l'un des satellites visibles utilisés par le récepteur GNSS 2 émet des informations suspectes, il est intéressant de pouvoir l'identifier pour le faire mettre à l'écart par le récepteur GNSS 2.

25 La figure 4 donne un exemple de schéma d'un système hybride INS/GNSS en boucle fermée équipé d'un détecteur de problème satellite et d'un identificateur de satellite défaillant.

Comme dans le cas de la figure 3, on retrouve une centrale inertielle INS 1, un récepteur GNSS 2, un filtre de Kalman d'hybridation 3
30 opérant sur les résidus des erreurs entre la position, en coordonnées géographiques, donnée par la centrale inertielle INS 1 et celle, également en coordonnées géographiques, donnée par le récepteur GNSS 2 et fournissant des informations de recalage à la centrale inertielle INS 1, et un circuit 4 de détection de problème de satellites analogue à celui de la figure 3
35 commandant un circuit d'inhibition 5 intercalé entre la sortie du filtre de

21

Kalman d'hybridation 3 et une entrée de recalage de la centrale inertielle INS 1.

En plus de ces éléments apparaît un circuit 6 identificateur de satellite défaillant opérant à partir de différents points de position, en coordonnées géographiques, effectués par le récepteur GNSS 2 avec tous les satellites visibles moins un et avec tous les satellites visibles moins deux, les deux satellites visibles écartés étant à chaque fois différents. Ce circuit 6 identificateur de satellite défaillant fonctionne en parallèle du circuit 4 de détection de problème satellite. Il est activé par le circuit 4 en cas de détection de problème de satellite. Il identifie le satellite défaillant pour le récepteur GNSS 2 qui ne le prend alors plus en compte pour faire le point de position et de vitesse qui est envoyé au filtre de Kalman d'hybridation. Une fois le satellite défaillant écarté, le circuit 6 identificateur de satellite désinhibe le circuit d'inhibition 5 et la plate-forme virtuelle PDV de la centrale inertielle INS 1 est à nouveau corrigée.

Le circuit 6 identificateur de satellite défaillant se base sur des tests en prenant comme références les différents points de position possibles avec N-1 satellites qui sont comparés à des points de position à N-2 satellites issus de ces points à N-1. Ces tests consistent à :

- 20 - évaluer, pour chaque sélection possible de N-1 satellites parmi les N observables, les écarts de position, en coordonnées géographiques, constatés entre le point de position fait par le récepteur GNSS 2 avec l'ensemble des N-1 satellites de la sélection et les différents points de position possibles à N-2 satellites que peut faire le récepteur GNSS 2 en écartant un satellite supplémentaire de la sélection,
- 25 - soumettre ces écarts à un banc de filtres prédicteurs-estimateurs pour évaluer l'erreur induite conjointement par deux satellites,
- 30 - comparer les états de ce deuxième banc de filtres prédicteurs-estimateurs avec les variances qui leurs sont associées,
- identifier la famille de filtres ne levant pas leur test statistique et en déduire le satellite en panne,
- 35 - indiquer au récepteur GNSS le satellite corrompu pour le retirer de l'ensemble des satellites visibles utilisés pour résoudre le

22

point de position (et de vitesse) à N satellites communiqué au filtre de Kalman

- désinhiber les corrections fournies par le filtre de Kalman à la centrale à inertie une fois le satellite défectueux retiré du point du récepteur GNSS et le filtre reconfiguré.

5

En effet, ce n'est que lorsque le satellite fautif est évincé de la sélection de N-1 satellites et des sélections de N-2 satellites qui en découlent que les tests statistiques sur les états des filtres prédicteurs-estimateurs ne se déclencheront pas (tests non levés).

10

Comme montré à la figure 5, le circuit 6 identificateur de satellite défaillant comporte un banc de $N.(N-1)/2$ filtres prédicteurs-estimateurs $61_{i,j}$ ($1 \leq i < j \leq N$, i et j désignent les satellites non observés lors de la résolution du point à N-2 fourni au filtre prédicteur-estimateur) traitant toutes les possibilités d'écarts entre un point de position, en coordonnées géographiques, à N-1 satellites visibles et un point de position, également en coordonnées géographiques, à N-2 satellites visibles, le satellite exclu de la sélection à N-1 satellite l'étant également de la sélection à N-2 satellites. Un circuit de test $62_{i,j}$ associé à chaque filtre prédicteur-estimateur $61_{i,j}$ du banc teste les états modélisés dans le filtre prédicteur-estimateur par rapport à leurs variances. Un circuit de traitement 63 extrait des tests fournis par les circuits de tests $62_{i,j}$ l'identité du satellite fautif.

15

Chacun des filtres prédicteurs-estimateurs $61_{i,j}$ du banc de filtre dédié à l'identification du satellite en panne a la même configuration que les filtres prédicteurs-estimateurs 40_i du banc de filtres dédiés à la détection de défaillance d'un satellite avec les mêmes matrices de gain K, d'évolution F et d'observation H, et reçoit, comme mesure, l'écart fourni par un circuit soustracteur $60_{i,j}$ entre la position, en coordonnées géographiques (latitude, longitude et altitude), résultant d'un point de positionnement $P_{(N-1)/i}$ effectué par le récepteur de positionnement par satellites GNSS 2 en tenant compte des N satellites visibles moins un, le $i^{\text{ème}}$ et la position en coordonnées géographiques résultant d'un point de positionnement $P_{(N-2)/i,j}$ effectué par le récepteur de positionnement par satellites GNSS 2 en écartant les informations du satellite déjà exclu, le $i^{\text{ème}}$ et d'un autre, le $j^{\text{ème}}$.

25

Les calculs des variances associées nécessaires aux circuits de tests $62_{i,j}$ pour comparer les états par rapport à leurs variances sont

30

35

23

exactement les mêmes que ceux décrits pour les circuits de test 41_i associés aux filtres prédicteurs-estimateurs 40_i du premier banc et ne seront pas repris ici. Seule l'observation est différente puisqu'il s'agit ici de différence entre des points résolus avec (N-1) satellites visibles et des points résolus
5 avec (N-2) satellites visibles.

Le circuit de traitement 63 compare les tests des N différentes familles, où le i^{ème} satellite a été enlevé pour la résolution du point de position à N-1 et des points de position à N-2 satellites ($1 \leq i \leq N$), puis identifie le satellite défectueux par le fait que seuls les filtres prédicteurs-estimateurs
10 d'une famille, celle ne prenant jamais en compte le satellite défectueux n'a aucun test statistique levé. En effet, toutes les autres familles de filtres prédicteurs-estimateurs comparant les points de position à N-1 où le satellite défaillant est présent avec des points de position à N-2 satellites ont au moins un test statistique levé. Ce circuit de traitement 63 permet d'éviter
15 l'utilisation du satellite corrompu dans la résolution du point GNSS fourni au système hybride.

Pour faciliter la compréhension, les fonctions réalisées dans un dispositif de surveillance de l'intégrité d'un système hybride INS/GNSS ont été illustrées sous forme de blocs séparés mais il est bien évident qu'elles
20 peuvent être remplies par un même calculateur à logique programmé, par exemple le calculateur de gestion du vol si le porteur du système hybride de positionnement est un aéronef.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif de surveillance de l'intégrité d'un système hybride constitué d'une centrale inertielle INS (1), d'un récepteur de positionnement par satellites GNSS (2) opérant à partir d'une constellation de N satellites
5 visibles, et d'un filtre de Kalman d'hybridation (3) ayant un vecteur d'états correspondant aux erreurs du système hybride, en particulier les erreurs de biais et de dérive résiduelles de la centrale inertielle INS (1), observant les écarts entre les points de positionnement et de vitesse fournis, en coordonnées géographiques, par la centrale inertielle INS (1) et par le
10 récepteur GNSS (2), ayant une matrice d'évolution F modélisant l'évolution des erreurs du système hybride, une matrice d'observation H modélisant les relations entre le vecteur d'états et les écarts observés entre les positions et de vitesses délivrées par la centrale inertielle INS (1) et le récepteur GNSS (2), et un gain K minimisant la covariance de l'erreur faite sur l'estimation a
15 posteriori du vecteur d'états du filtre de Kalman et en particulier des erreurs résiduelles de la centrale inertielle INS (1), et délivrant une estimée a posteriori des erreurs du système hybride qui sert à recalibrer la centrale inertielle INS (1), caractérisé en ce que le récepteur GNSS (2) délivre en plus d'un point de position effectué à partir des N satellites visibles qu'il a en vue,
20 des points de position $P_{(N-1)/i}$, $i \in [1, \dots, N]$ résolus avec N-1 satellites visibles déduits de la constellation des N satellites visibles en la privant à chaque fois d'un satellite différent et en ce qu'il comporte un circuit (4) détecteur de problème satellite comportant un banc de N filtres prédicteurs-estimateurs (40_i) de l'erreur induite par le satellite qui a été ôté lors de la résolution d'un
25 point de position à N-1 satellites, ayant le gain K et la matrice d'évolution F du filtre de Kalman d'hybridation (3), observant chacun l'écart entre le point de position, en coordonnées géographiques, délivré par le récepteur GNSS (2) en observant les N satellites visibles et l'un des points de position $P_{(N-1)/i}$, également en coordonnées géographiques, délivrés par le récepteur GNSS
30 (2) en observant N-1 satellites visibles et des circuits de test (41_i) comparant les états des filtres prédicteurs-estimateurs (40_i) à leurs variances et détectant une panne satellite lorsque le test est positif, l'écart trouvé étant supérieur à un seuil de détection.

25

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les seuils de détection sont des seuils statistiques qui tiennent compte de la covariance associée au type d'erreur de positionnement considéré.

5 3. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les seuils de détection sont des seuils statistiques qui tiennent compte de la covariance associée au type d'erreur de positionnement considéré et qui sont fonction du taux de fausse alarme acceptable pour le test.

10 4. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte un circuit (5) d'inhibition de recalage intercalé entre la sortie du filtre de Kalman d'hybridation (3) et une entrée de recalage de la centrale inertielle INS (1), et activé par le circuit (4) détecteur de problème satellite.

15 5. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les filtres prédicteurs-estimateurs (40_i) du circuit (4) détecteur de problème satellite ont tous la même matrice d'observation.

20 6. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le récepteur GNSS (2) délivre des points de position $P_{(N-1)/i}$ $i \in [1, \dots, N]$ et $P_{(N-2)/i,j}$ ($1 \leq i < j \leq N$), en coordonnées géographiques, résolus à partir de N-1 et N-2 satellites déduits des N satellites visibles en retirant à chaque fois un satellite visible différent, le $i^{\text{ème}}$ pour le point $P_{(N-1)/i}$, et en retirant en plus un autre satellite parmi les N-1 restant, le $j^{\text{ème}}$ pour le point $P_{(N-2)/i,j}$, et en ce qu'il
 25 comporte un circuit (6) identificateur de satellite défaillant comportant un banc de $N \times (N-1)/2$ filtres prédicteurs-estimateurs (61_{i,j}) estimateur de l'erreur induite conjointement par deux satellites parmi les N observables ayant le gain K et la matrice d'évolution F du filtre de kalman d'hybridation (3), observant chacun l'écart entre un point de position ($P_{(N-1)/i}$), en coordonnées
 30 géographiques, délivré par le récepteur GNSS (2) à partir d'une constellation spécifique de N-1 satellites visibles et l'un des points de position $P_{(N-2)/i,j}$ délivrés par le récepteur GNSS (2) à partir d'une constellation de (N-2) satellites visibles déduite de la constellation spécifique de (N-1) satellites visibles privée de l'un de ses satellites, le $j^{\text{ème}}$, les filtres prédicteurs-
 35 estimateurs pouvant être regroupés par familles de N-2 éléments en fonction

de la constellation spécifique de $N-1$ satellites prise en compte, un banc de circuits de test ($62_{i,j}$) comparant les états des filtres prédictors-estimateurs ($61_{i,j}$) à leurs variances et détectant une anomalie lorsque l'écart trouvé est supérieur à un seuil de détection, et un circuit de traitement des résultats des tests (63) centralisant les tests levés identifiant, en cas d'anomalie détectée, un satellite fautif comme étant le satellite exclu d'un point de position résolu avec $N-1$ satellites dont la famille de filtres prédictors-estimateurs est la seule à n'avoir aucun de ses éléments détectant une anomalie.

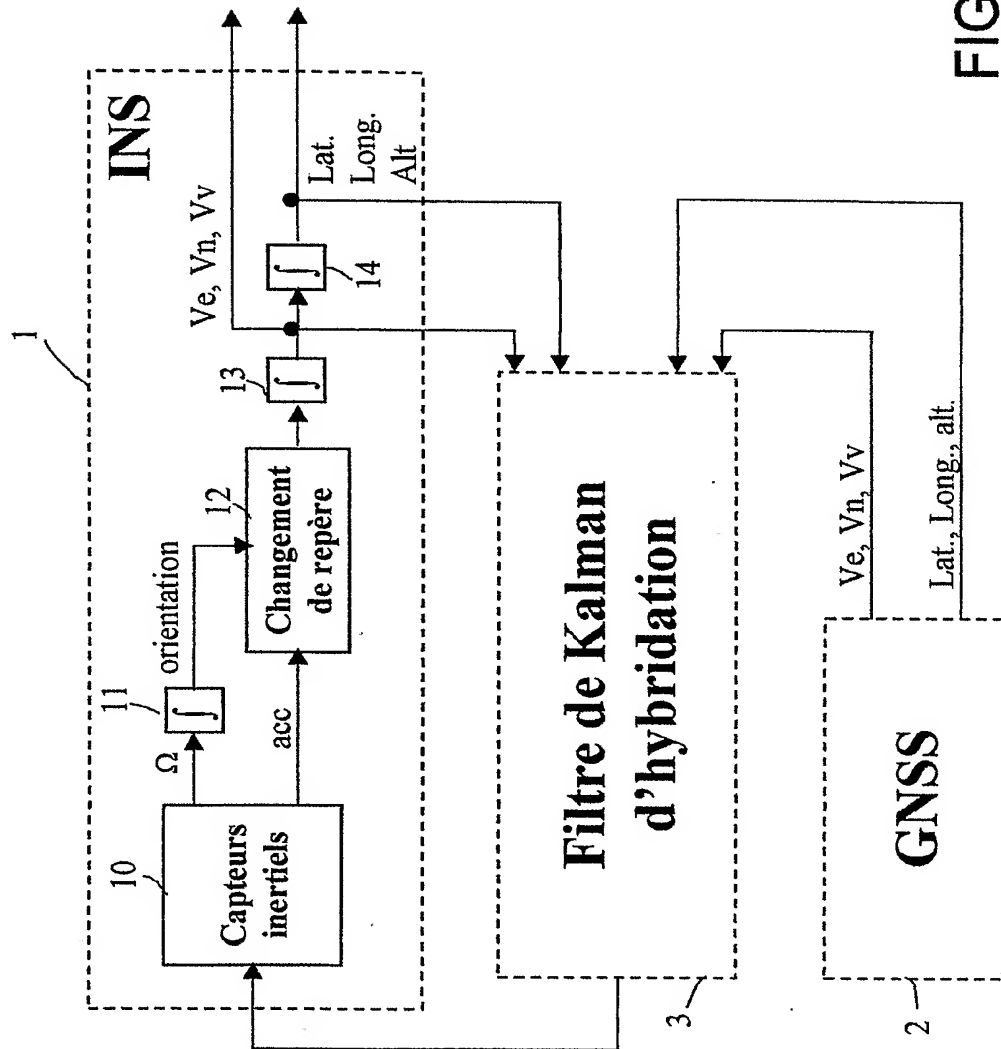
10 7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que les seuils de détection des circuits de test ($62_{i,j}$) du circuit (6) identificateur de satellite défaillant sont des seuils statistiques tenant compte de la covariance associée au type d'erreur de positionnement considéré.

15 8. Dispositif selon la revendication 7, caractérisé en ce que les seuils de détection des circuits de test ($62_{i,j}$) du circuit (6) identificateur de satellite défaillant sont des seuils statistiques qui tiennent compte de la covariance associée au type d'erreur de positionnement considéré et qui sont fonction du taux de fausse alarme acceptable pour le test.

20

9. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que les filtres prédictors-estimateurs ($61_{i,j}$) du circuit (6) identificateur de satellite défaillant ont tous la même matrice d'observation.

25 10. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que les filtres prédictors-estimateurs (40_i , $61_{i,j}$) du circuit (4) détecteur de problème satellite et du circuit (6) identificateur de satellites défaillant ont tous la même matrice d'observation.



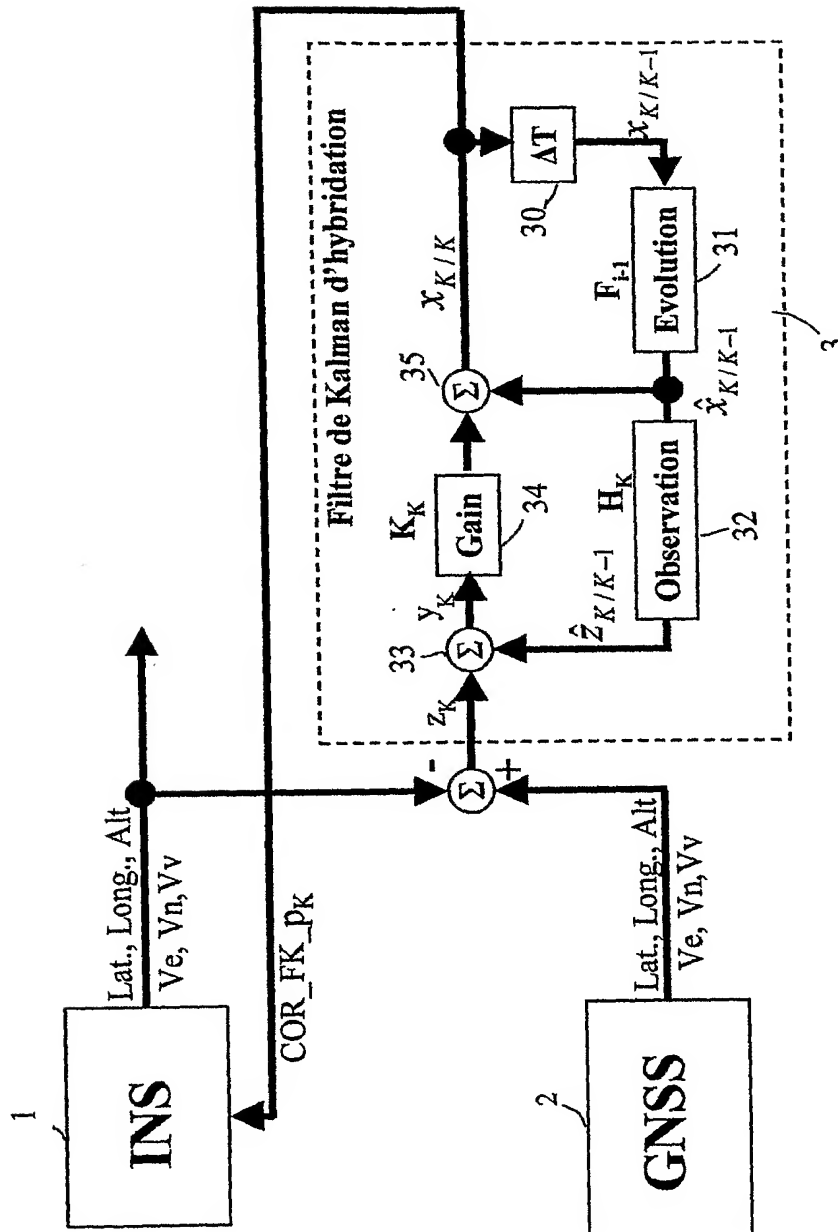


FIG.2

3/5

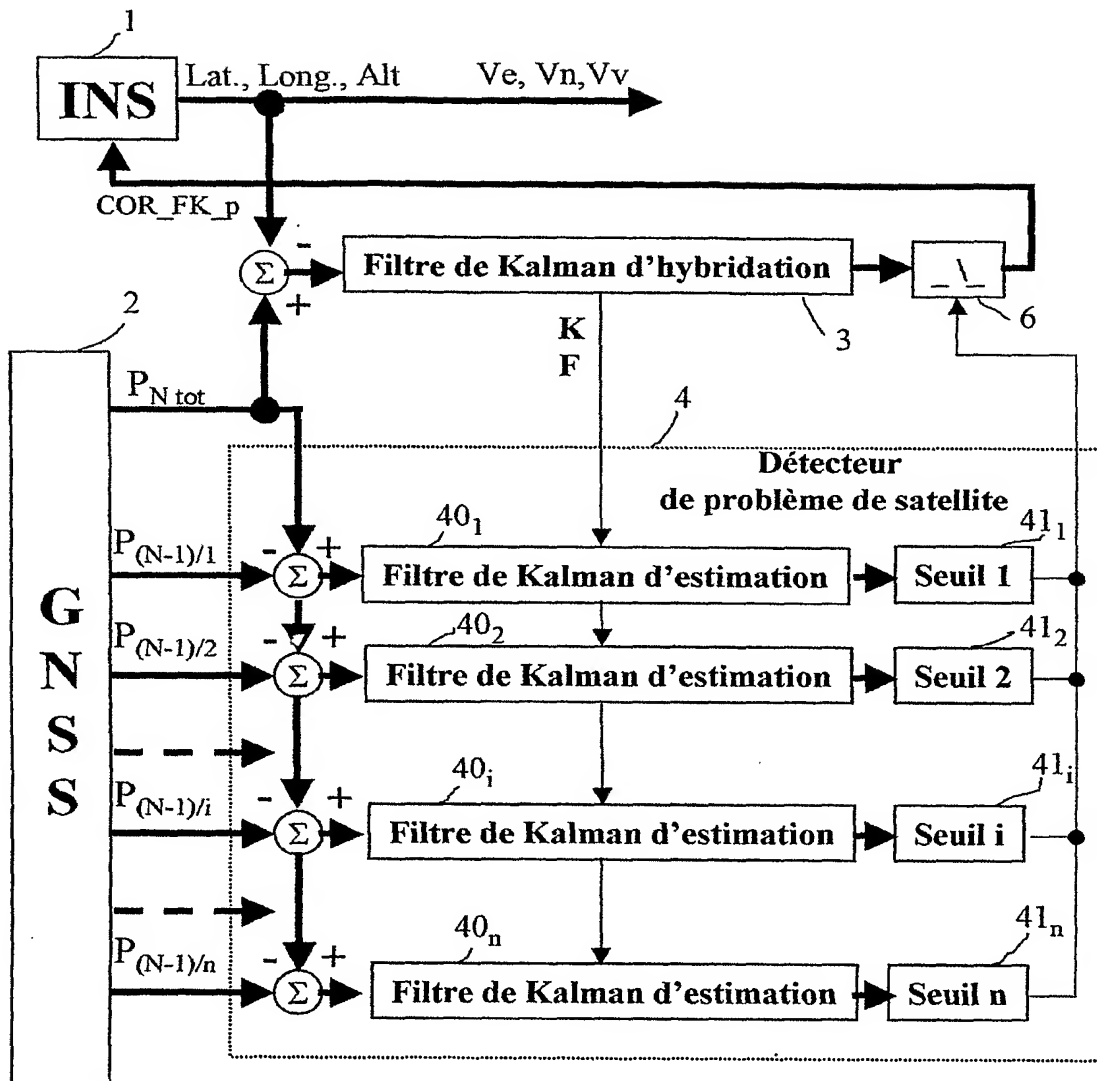


FIG.3

4/5

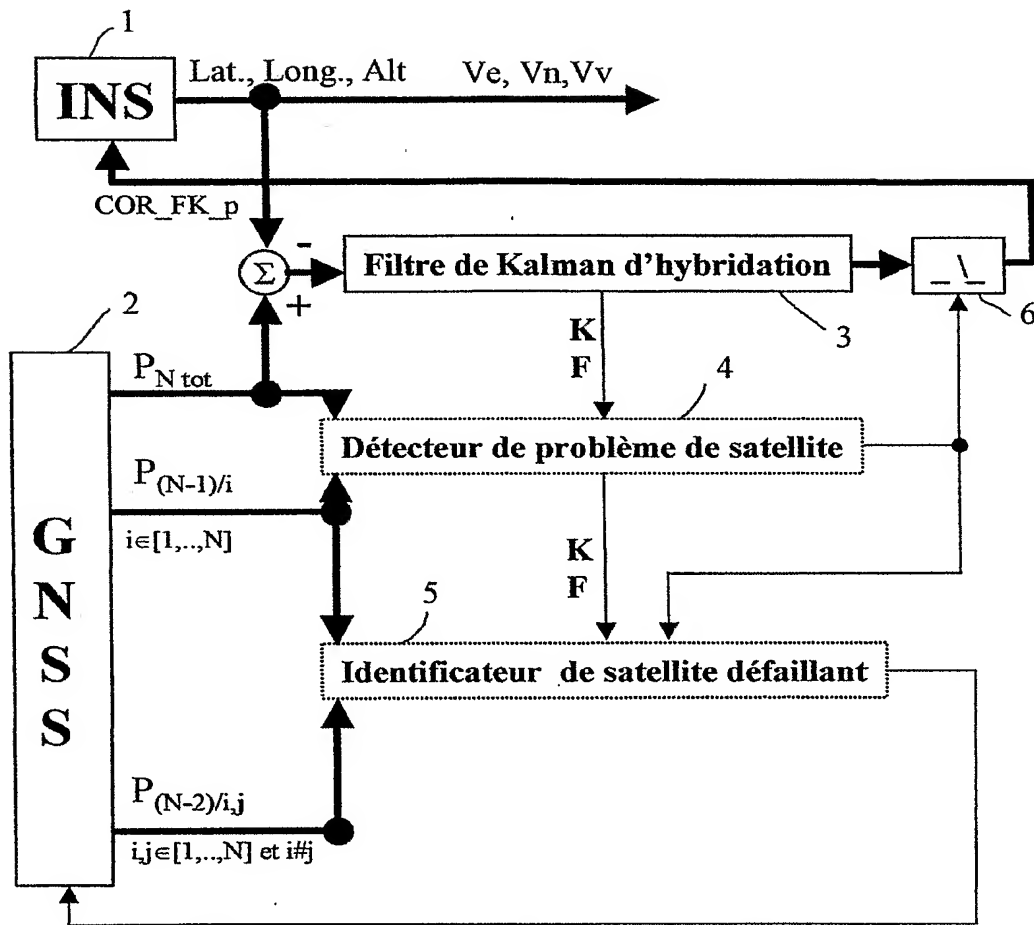


FIG.4

5/5

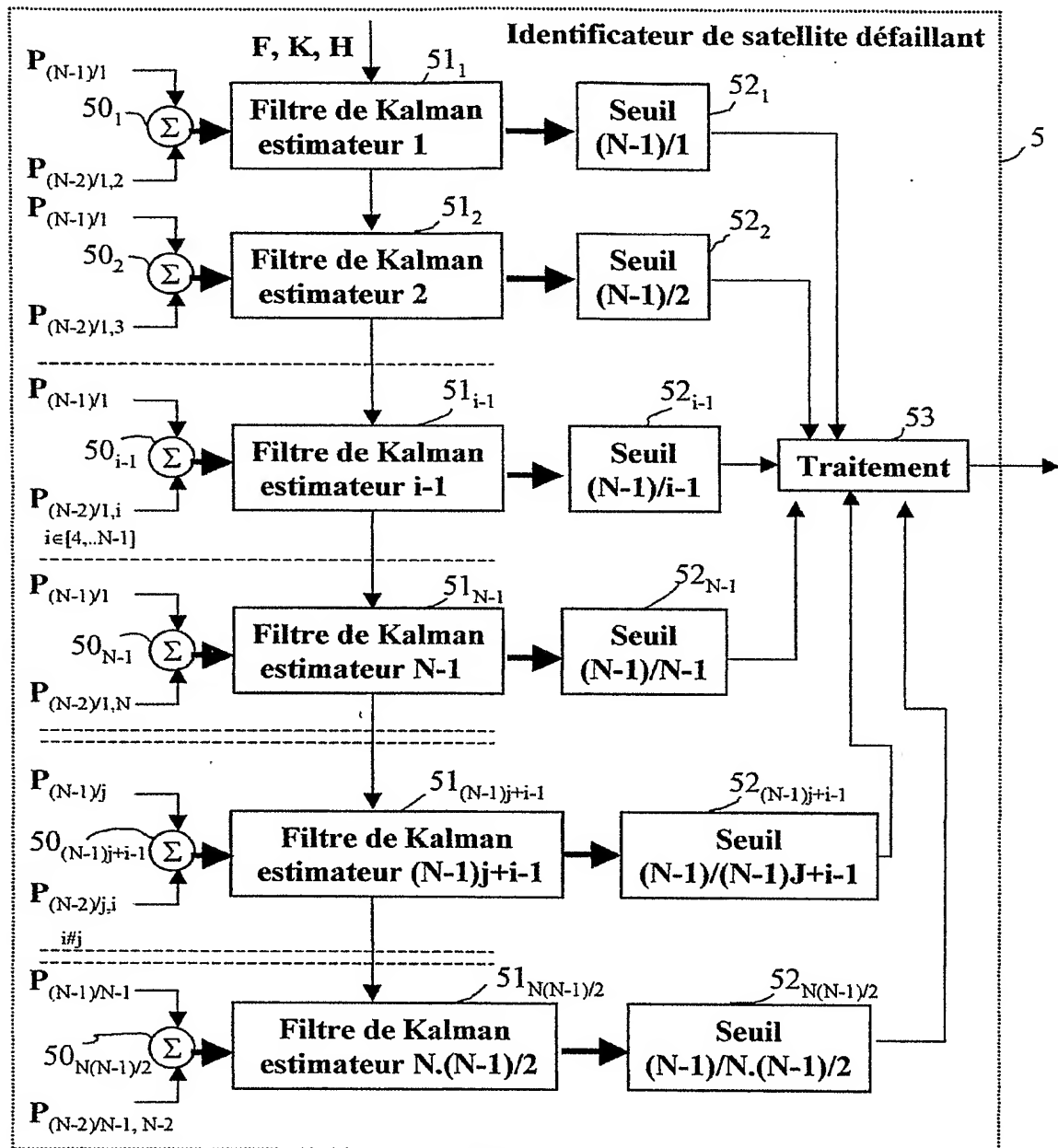


FIG.5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/050390

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 G01S5/14 G01C21/16		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 G01C G01S		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 583 774 A (DIESEL JOHN W) 10 December 1996 (1996-12-10) column 3, line 28 - column 11, line 54; figures 1-4	1-10
A	----- WO 01/46712 A (THALES AVIONICS SA) 28 June 2001 (2001-06-28) the whole document	1-10
A	----- FR 2 830 320 A (THALES) 4 April 2003 (2003-04-04) the whole document -----	1-10
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. </div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex. </div> </div>		
* Special categories of cited documents :		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>*A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>*E* earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>*L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>*O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>*P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>*T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>*X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>*Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.</p> <p>*&* document member of the same patent family</p> </div> </div>		
Date of the actual completion of the international search <div style="text-align: center; font-weight: bold;">2 June 2005</div>	Date of mailing of the international search report <div style="text-align: center; font-weight: bold;">01/07/2005</div>	
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer <div style="text-align: center; font-weight: bold;">Fourrichon, P</div>	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2005/050390

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5583774	A	10-12-1996	AU 687215 B2	19-02-1998
			AU 2822095 A	05-01-1996
			CA 2167916 A1	21-12-1995
			CN 1135265 A ,C	06-11-1996
			EP 0714526 A1	05-06-1996
			JP 9507912 T	12-08-1997
			KR 203969 B1	15-06-1999
			WO 9534850 A2	21-12-1995
WO 0146712	A	28-06-2001	FR 2802732 A1	22-06-2001
			EP 1157284 A1	28-11-2001
			WO 0146712 A1	28-06-2001
			ZA 200106724 A	15-02-2002
FR 2830320	A	04-04-2003	FR 2830320 A1	04-04-2003
			CA 2461595 A1	10-04-2003
			EP 1430272 A1	23-06-2004
			WO 03029755 A1	10-04-2003
			US 2004239560 A1	02-12-2004

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No
PCT/EP2005/050390

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G01S5/14 G01C21/16

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
CIB 7 G01C G01S

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 5 583 774 A (DIESEL JOHN W) 10 décembre 1996 (1996-12-10) colonne 3, ligne 28 - colonne 11, ligne 54; figures 1-4	1-10
A	WO 01/46712 A (THALES AVIONICS SA) 28 juin 2001 (2001-06-28) le document en entier	1-10
A	FR 2 830 320 A (THALES) 4 avril 2003 (2003-04-04) le document en entier	1-10

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- *X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- *Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- *Z* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

2 juin 2005

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

01/07/2005

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Fourrichon, P

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Dem... Internationale No
PCT/EP2005/050390

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5583774	A	10-12-1996	AU 687215 B2	19-02-1998
			AU 2822095 A	05-01-1996
			CA 2167916 A1	21-12-1995
			CN 1135265 A ,C	06-11-1996
			EP 0714526 A1	05-06-1996
			JP 9507912 T	12-08-1997
			KR 203969 B1	15-06-1999
			WO 9534850 A2	21-12-1995
WO 0146712	A	28-06-2001	FR 2802732 A1	22-06-2001
			EP 1157284 A1	28-11-2001
			WO 0146712 A1	28-06-2001
			ZA 200106724 A	15-02-2002
FR 2830320	A	04-04-2003	FR 2830320 A1	04-04-2003
			CA 2461595 A1	10-04-2003
			EP 1430272 A1	23-06-2004
			WO 03029755 A1	10-04-2003
			US 2004239560 A1	02-12-2004